

В.В. Набагов**ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ОБСЛЕДОВАНИЯ
МАССИВОВ ПОРОД ВБЛИЗИ АВАРИЙНЫХ
КОЛЛЕКТОРОВ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ ДАННЫХ
СМР-ИЗМЕРЕНИЙ**

Обобщен опыт георадиолокационного обследования массива пород вблизи аварийных коллекторов. Приведены радарограммы, интерпретации и обобщение идентификационных признаков для таких объектов как линзы водонасыщенных пород, погребенные русла рек, техногенные полости и зоны дренированных пород. В качестве одного из признаков выступают результаты СМР-исследований (получение годографов). Для съемок использованы сверхмощные георадары с резистивно-нагруженными антеннами (георадар «Лоза-1Н»).

Ключевые слова: коллектора, аварийные подземные коммуникации, линзы водонасыщенных пород, погребенные русла рек, техногенные полости и зоны дренированных пород, георадиолокация, низкочастотные георадары, сверхмощные георадары, высокая глубинность.

Введение

Одна из наиболее опасных аварийных ситуаций, связанных с щитовой проходкой коллекторов связана с прорывом грунтовых вод в строящийся тоннель. Последствиями подобных аварий могут быть сдвигения дневной поверхности и образование полостей под проезжей частью и зданиями [1; 2]. При этом технологические операции связанные с восстановлением, ремонтом, перекладкой аварийных коллекторов обычно требуют предварительного детального дообследования массива пород вблизи коллектора. Целью обследования может быть как дооценка исходной опасности массива – например, нужно выявить наличие еще незатронутых водонасыщенных областей. Так и оценка влияния самой уже сложившейся аварийной ситуации – разуплотненные грунты; образовавшиеся полости; возникшие протечки из коммуникаций.

Одним из наиболее эффективных инструментов при анализе геологической ситуации является георадиоло-

кация [3; 4]. Для достаточно сложных для обследования условий городских грунтов часто наиболее предпочтительным оказывается использование сверхмощных георадаров, способных существенно расширять спектр решаемых георадиолокацией задач. При этом новые решаемые задачи, требуют нового опыта интерпретации. Примерам подобных решений и посвящена эта статья.

**Методические особенности
проводившихся исследований**

В статье изложен в основном опыт работы со сверхмощными георадарами, использующими резистивно-нагруженные антенны [5; 6]. Причиной выбора именно этого типа оборудования связан с рядом проблем обследования грунтовых массивов городов. Среди этих проблем можно назвать: неоднородность свойств пород, содержание большого количества помеховых объектов [7], наличие глинистых толщ в разрезах [8] и как следствие – небольшая глубинность георадиолокацион-

ного обследования [4]. Последний тезис является наиболее острым, поскольку достаточно большое количество коллекторов проложено на глубине 5–10 м и традиционные георадары в условиях городских грунтов часто не справляются с этими глубинами. Выходом здесь является: повышение мощности излучения; понижение его средней частоты; разработка методов обработки сигналов, оптимальных для этих частот; повышение вертикальной разрешающей способности за счет резистивной нагрузки антенн [4]. Большинство этих подходов реализовано в сверхмощных георадарах серии «Лоза», что позволяет получать на них результаты для глубин в десятки метров в условиях городских грунтов [3]. Обострение же «воздушных» помех, связанное с увеличением мощности излучения обычно не является камнем преткновения.

Все материалы этой статьи получены на георадаре «Лоза-1Н» с трехметровыми антеннами (50 МГц) в рамках обследований грунтов вблизи аварийных коллекторов г. Москвы. На всех представленных радарограммах левая вертикальная ось – время в наносекундах, правая вертикальная ось – глубина в метрах, горизонтальная ось – длина вдоль по профилю в метрах. Типичные шаги между трассами от 20 до 50 см. Накопления не использовались, для того чтобы не обострять «воздушные» помехи. В обработке преобладают: логарифмирование значений амплитуд, высокочастотная и низкочастотная фильтрация (используются горизонтальный, вертикальный и наклонный варианты), вычисление производной, различные особенности работы со шкалой цветового кодирования амплитудных значений. Вся обработка производилась в программе Krot версий 179Ns1 и 1403 (это стандартная программа обработки данных георадара «Лоза»).

В качестве дополнительной аргументации в статье приводится анализ георадиолокационных годографов. В международной литературе этот метод часто называют WARR (wide-angle reflection-refraction [9]), либо CMP (common mid point [10]). В отечественной литературе его можно встретить под названием георадиолокационное зондирование [11]. При CMP разносят приемную и излучающую антенны, получая годограф отраженной волны. Уравнение годографа отраженной волны представляет собой следующее выражение [8, с. 48; 11]:

$$t = \frac{1}{V} \cdot \left(\sqrt{x^2 + 4 \cdot h^2} \right) = \\ = \frac{\sqrt{\varepsilon'}}{c} \cdot \left(\sqrt{x^2 + 4 \cdot h^2} \right) ,$$

где t – время задержки, V – скорость электромагнитной волны в среде, x – межантенное расстояние, h – глубина отражающей границы, ε' – действительная часть диэлектрической проницаемости среды, c – скорость электромагнитной волны в вакууме. Опираясь на (1), годограф позволяет получать оценку ε' :

$$\varepsilon' = \frac{t^2 \cdot c^2}{x^2 + 4 \cdot h^2} ,$$

что дает возможность пересчитывать времена первых вступлений в глубины, а также анализировать гидрогеологическую ситуацию в разрезе (за счет высокого значения ε' воды).

Из-за особенностей диаграммы направленности годограф трудно получить для больших межантенных расстояний – т.е. получается анализировать только начальные участки годографов. Однако для большинства случаев этого вполне достаточно.

Касательно приводимых в статье годографов требуется произвести некоторые уточнения. Во всех случаях CMP-радарограммы снимались в диапазоне межантенных расстояний

0,6÷6 м, т.е. первая трасса СМР-радарограммы имеет привязку 0,6 м. При этом визуализировать и подбирать модель годографа удобнее если СМР-радарограмма в Krot смещена на 2 м. Поэтому на рисунках первая трасса находится на отметке 2 м, а нулевое межантенное расстояние соответствует отметке 1,4 м – там же находятся начальные точки моделей годографов. Анализируя результаты СМР можно заметить, что начальная точка модели годографа не является

точкой минимальной задержки (особенно хорошо это заметно рис. 7). Это следствие аппаратных особенностей георадара «Лоза» [11].

Результаты исследований и их обобщение

Опыт, набранный в процессе обследований массивов пород вблизи аварийных коллекторов, позволяет выделить несколько типов объектов, выявляемых при георадиолокационных изсканиях. Первичной задачей

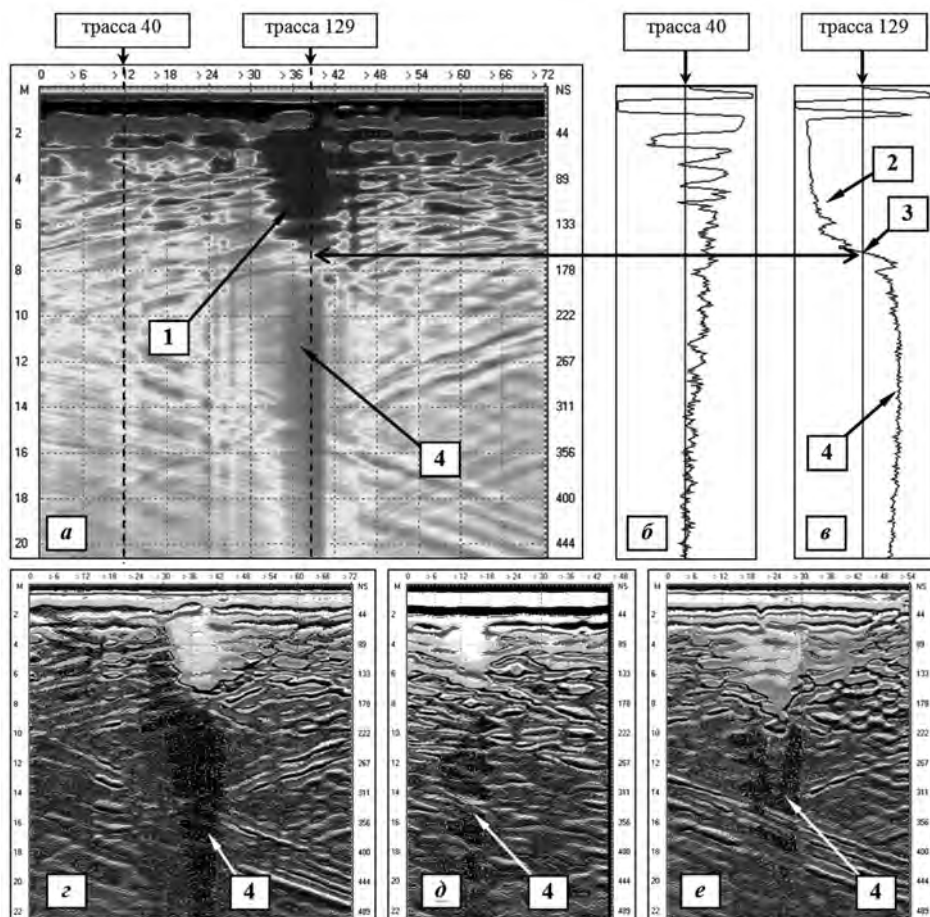


Рис. 1. Пример выявления водонасыщенных областей: а) радарограмма ($\varepsilon' = 11,1$); б) трасса полученная вне области; в) трасса полученная над областью; г), д), е) различные примеры выявленных водонасыщенных областей; 1 – область разуплотнения; 2 – отрицательная амплитудная аномалия; 3 – точка перехода через ноль; 4 – положительная амплитудная аномалия

обычно является выявления геологических объектов, которые ранее могли вызвать аварию и некоторые из которых могут в последствии повлиять на технологические процессы ремонтных работ. К таким объектам относятся линзы водонасыщенных пород и погребенные русла рек.

1. *Линзы водонасыщенных пород.* Как при строительстве так и при восстановлении коллектора такие водонасыщенные области могут быть потревожены, что может привести к их разгрузке в коллектор с последующей осадкой поверхности. На рис. 1 представлены примеры радарограмм, полученных над областями водонасыщенных пород. На рис. 1, а хорошо видна подобная область, указанная цифрой 1. В этом примере аномальное изменение сигналов достаточно хорошо выражено, подчас такие объекты видны без специальной обработки радарограммы. Положительную роль здесь играют высокая мощность георадара и низкая частота, увеличивающие глубинность. А также аперийная форма импульса, делающая радарограмму более читабельной. Описываемые объекты обычно достаточно компактны в плане, что удобно выявлять по срезам кубов амплитуд, полученных из площадной съемки.

Линзы водонасыщенных пород характеризуются рядом волновых аномалий. В первую очередь эти признаки связаны с существенным изменением проводимости среды σ . Эта особенность приводит к появлению низкочастотных «хвостов» (НЧХ) на трассах, по своей природе близких к кривым, получаемым при бесконтактной электроразведке. Пример подобного «хвоста» можно увидеть на рис. 1, в, где представлена трасса № 129, снятая над областью разуплотнения. Для сравнения также дана трасса № 40 снятая вне области (см. рис. 1, б).

Достаточно часто такой НЧХ формируется при прохождении области с высокой проводимостью именно как отрицательная амплитудная аномалия (цифра 2), причем не переходящая через ноль. Приведенный же пример трассы № 129 такой переход через ноль содержит (цифра 3). Это позволяет сделать предположение, что вблизи от этого перехода наблюдается вступление отраженного от нижней границы области аперийного сигнала с сильно искаженной волновой формой. Этот сигнал также можно назвать НЧХ, однако его характерной особенностью будет положительная амплитуда. Подобный характер сигнала – положительная амплитудная аномалия, возникающая после отрицательной – это достаточно распространенный признак, что можно проиллюстрировать рядом примеров (см. рис. 1, а, г–е положительные аномалии указаны цифрой 4).

Отдельным признаком водонасыщенной области может являться изменение формы годографа, полученного с помощью методики СМР. На рис. 2 дан пример СМР-радарограммы, полученной над водонасыщенной линзой. Здесь обработкой можно выделить два годографа – для границы на глубине 2 м и для границы на глубине 4 м (ось глубин корректна по отношению к четырехметровой границе и искажена по отношению к двухметровой). Верхний годограф позволяет получить оценку $\epsilon' = 14,8$, нижний $\epsilon' = 56,25$. Оценка ϵ' верхнего годографа близка к типичной, полученной в окрестности разуплотнения по таким же годографам и гиперболическим осям синфазности (ГОС) от локальных объектов. Нижний же годограф указывает на резкое увеличение ϵ' и падение скорости электромагнитных волн. Другими словами, нижний годограф дает среднюю скорость за толщу, включающую обводнен-

ные слои массива. И таким образом подтверждает их наличие. Обобщая можно сказать, что признаками водонасыщенных областей являются их геометрическая компактность, форма годографов, ярко выраженные волновые аномалии, указывающие на обводненность пород.

2. Погребенные русла рек (палеорусла). С этими объектам связан целый ряд проблем: резкие изменения прочностных свойств грунтов, подтопления, возможные подвижки грунтов. Сами по себе русла сохраняют функцию путей фильтрации грунтовых вод и их дренажа из окружающего массива. В некоторых случаях вблизи от палеорусел можно с помощью геофизических методов наблюдать депрессивные воронки [12]. Подобные области важно выявить до процедур ремонта коллектора. Поскольку палеорусло протяженный объект, его желательно выявлять площадной съемкой, либо с помощью профилей, оконтуривающих площадку обследования.

На рис. 3, а дан пример выявленного палеорусла. Интерпретацион-

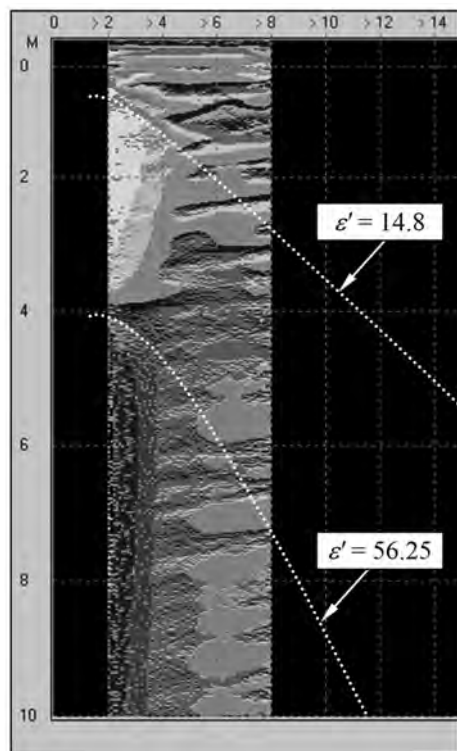


Рис. 2. Результат СМР-съемки, проведенного над областью водонасыщенных пород

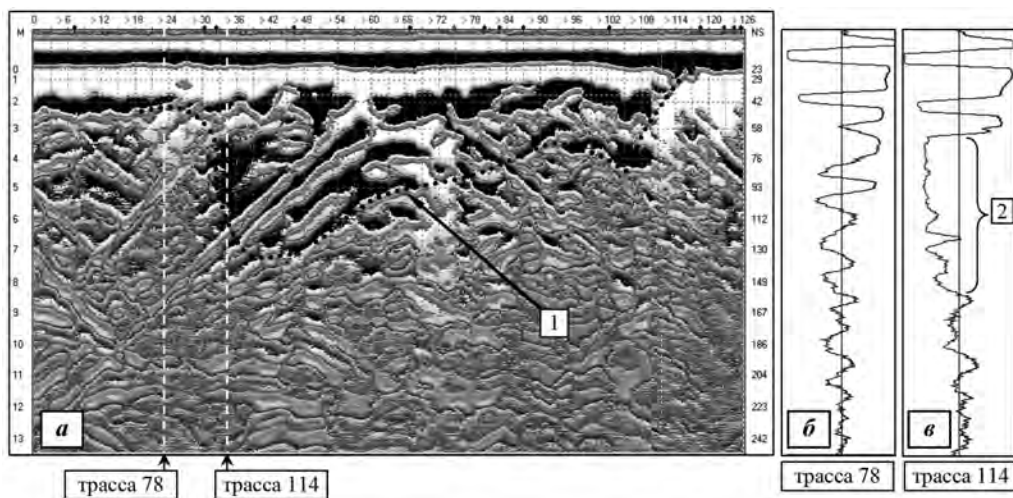


Рис. 3. Пример выявления палеорусла: а) радарограмма ($\epsilon' = 8$); б) трасса полученная вне палеорусла; в) трасса полученная над палеоруслом; 1 – граница, интерпретированная как погребенный речной врез; 2 – участок трассы, испытывающий влияние низкочастотной компоненты

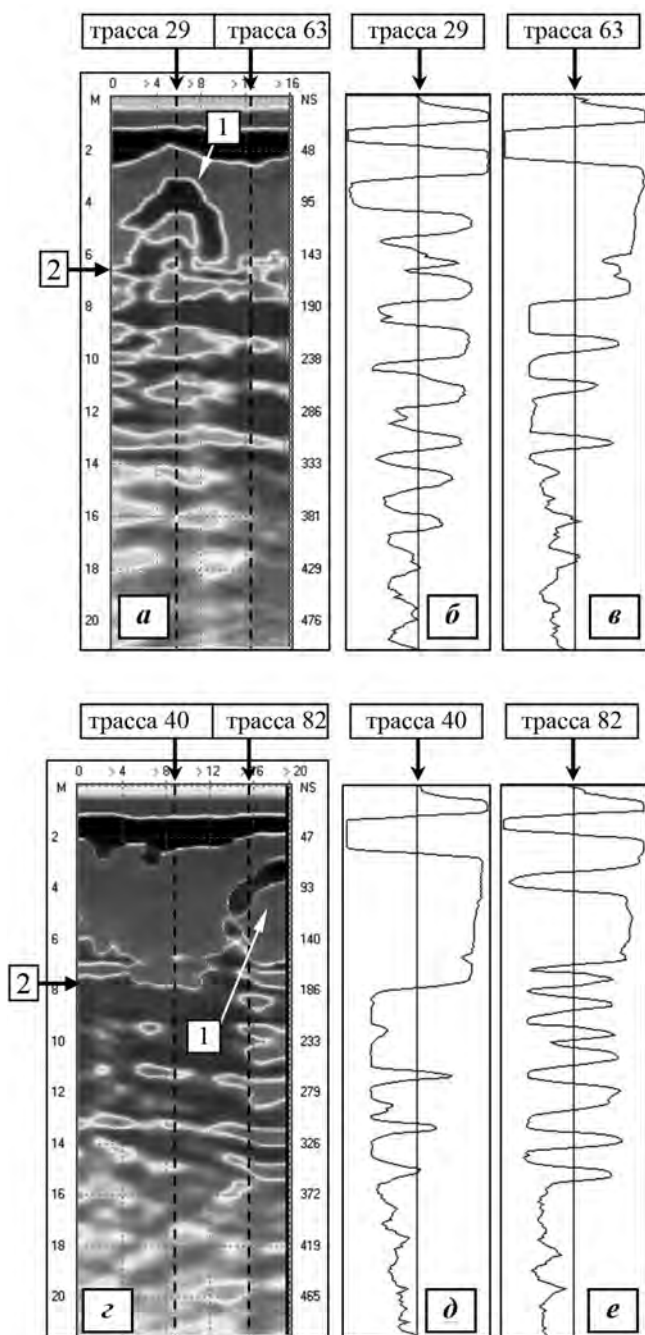


Рис. 4. Пример выявления техногенных полостей вблизи от аварийного коллектора: а), г) радарограммы ($\epsilon' = 12.8$); б), е) трассы, полученные над полостью; в), д) трассы, полученные вне полости; 1 – радиообраз полости; 2 – 2-й УГВ

ными аргументами здесь были резкое изменение волновой картины и перепад времен оси синфазности, форму которой можно интерпретировать как радиообраз погребенного речного вреза. Он достаточно хорошо просматриваются не смотря на наложившуюся на радиообраз «воздушную» помеху. На рис. 3, б, в даны трассы, взятые вне влияния палеоруслы и над ним. Можно заметить, что здесь также присутствует изменение формы трассы в зависимости от водонасыщенности пород: на участке, обозначенном цифрой 2 проявляется низкочастотная компонента, с выраженным отрицательным полупериодом (низко-частотный «хвост»). Подобным образом вели себя и трассы, при выявлении водоносных линз. Таким образом признаками полеорусел являются их геометрическая протяженность, форма осей синфазности, форма годографов и волновые аномалии, указывающие на обводненность массива пород.

Далее рассмотрены примеры геологических особенностей массивов, которые возникли по причине уже случившейся аварии. К ним относятся полости вблизи коллекторов и массивы дренированных пород.

3. *Полости вблизи коллекторов.* Полости могут образовываться и как результат выпуска воды в

коллектор и как результат его разрушения (результат сдвижения пород). Приведенные на рис. 4 примеры касаются второго случая – это два подтвержденных участка разрушения коллектора с образованием полостей выше него. Непосредственно сами радиообразы полостей указаны цифрой 1. Они выглядят как выраженные куполообразные структуры. В обоих случаях под куполами просматривается «звенящий» сигнал.

Форма верхней границы «купола» соответствует ГОС с ϵ' типичной для этого массива пород (оценена по СМР-измерениям на небольшом удалении от профиля). Однако, возможно, все-таки купол образует сама подземная структура. Поскольку найденные на этой площадке несколько ГОС от подземных объектов проявлены значительно слабее приведенных примеров. Стоит уточнить, что граница «купола» не соответствует ГОС «воз-

душной» помехи и что на этом участке вблизи от профиля не было источников «воздушных» помех.

Для каждой радарограммы дана пара трасс (при съемке над полостью и в стороне от нее). При анализе трасс можно заметить, что на трассах рис. 4, б, в (трассы сняты над полостью) после первого вступления отраженной от полости волны не наблюдается отрицательных низкочастотных амплитудных аномалий. Это позволяет предположить, что полость не заполнена водой (полость находится ниже водоупора). Низкочастотные амплитудные аномалии можно увидеть на нижних участках трасс рис. 4, в, д, однако на радарограмме они находятся значительно ниже радиообразов полостей. Эти волновые аномалии вызваны вторым УГВ, проходящим ниже водоупора. Таким образом интерпретационные признаки полостей можно свести к форме

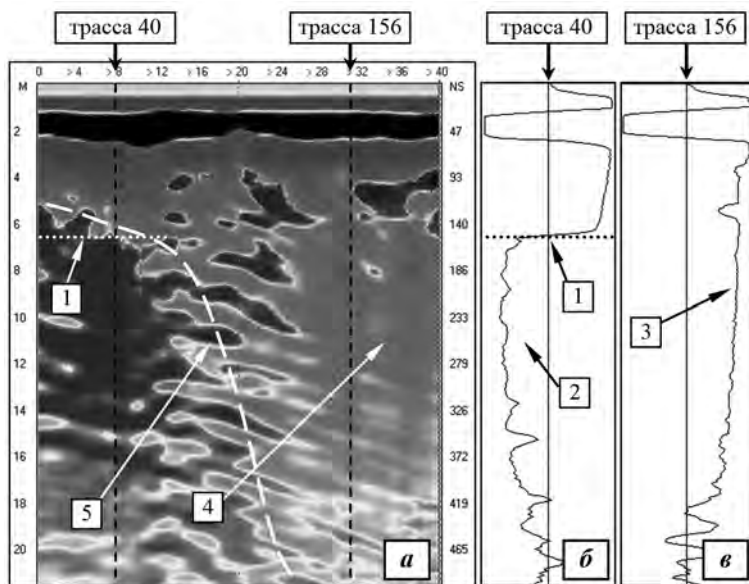


Рис. 5. Пример выявления зоны дренированных пород вблизи от аварийного коллектора: а) радарограмма ($\epsilon' = 12$); б) трасса, полученная вне зоны дренированных пород; в) трасса, полученная над зоной дренированных пород; 1 – УГВ; 2 – отрицательная амплитудная аномалия; 3 – положительная амплитудная аномалия; 4 – зона дренированных пород; 5 – граница зоны дренированных пород

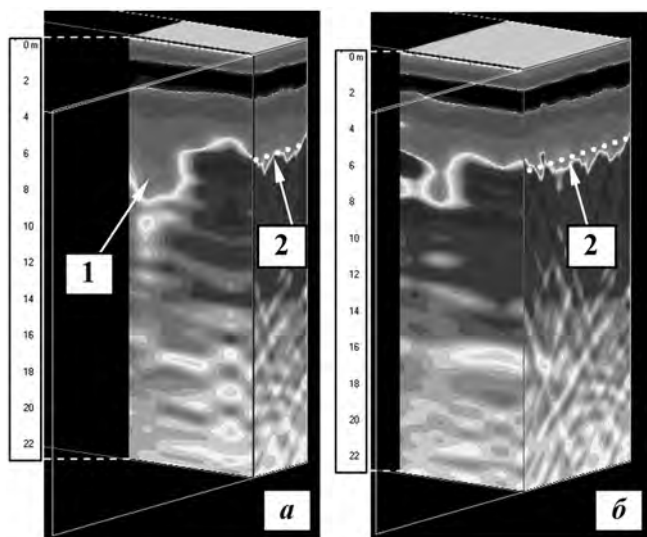


Рис. 6. Вертикальные сечения куба амплитуд указывающие на развитие депрессивной воронки в УГВ ($\epsilon' = 13$): а) сечение через воронку, б) сечение за пределами воронки; 1 – воронка; 2 – УГВ

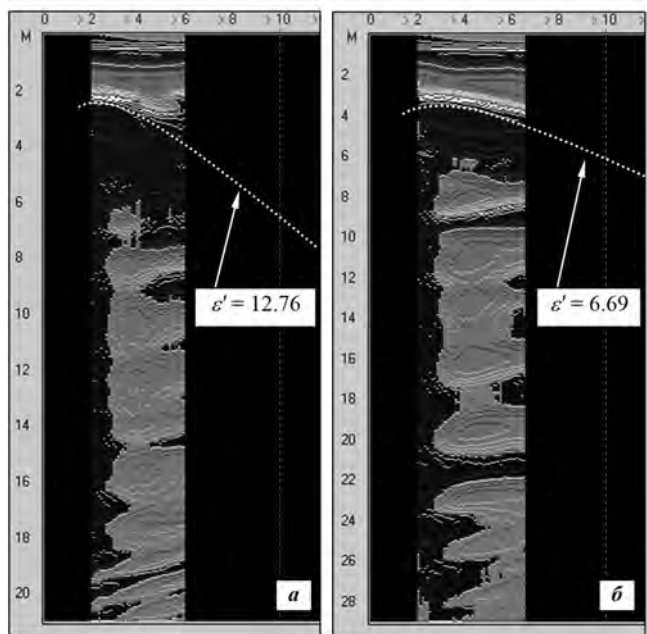


Рис. 7. Изменение формы географа при съемке над дренированными породами: а) географ снятый над обычными массивов, б) географ снятый над дренированным массивом

границ и специфике волновых аномалий.

4. Зоны дренированных пород. При выпуске большого количества воды в коллектор изменяется гидрогеология прилегающего массива (массив осушается, дренируется). Связанные с этим особенности георадиолокационных сигналов могут быть индикаторами, указывающими на аварию. Также могут наблюдаться депрессионные воронки в УГВ.

Примером выявленной зоны дренированных пород является радарограмма рис. 5. Левая часть радарограммы – обычный массив с УГВ, указанным цифрой 1. На трассе 40, снятой в этой части массива можно заметить описанную выше отрицательную амплитудную аномалию с низкочастотным «хвостом» (цифра 2), которая начинается ниже УГВ (цифра 1). Правая часть радарограммы (цифра 4) содержит обратную ситуацию – положительную аномалию (цифра 3). Часто подобная аномалия указывает на дренированные породы. Формы сигналов приводят к тому что на приведенной на рис. 5 радарограмме левая ее часть кодируется синим цветом, а правая (дренированная) – красным.

Ось синфазности, обозначенную цифрой 5 на рис. 5 желательно не читать как явную границу депрессионной воронки, поскольку в этом случае

слишком сильно проявляется эффект низкочастотного хвоста – сигнал фактически описывает не границы в массиве, а свойства массива. В большей степени смыслу границы, созданной депрессионной воронкой в УГВ соответствует другой пример, представленный на рис. 6. Здесь изображены вертикальные сечения куба амплитуд, полученного в процессе площадной съемки. Хорошо просматривается воронка (цифра 1) в УГВ (цифра 2), вызванная выпуском воды в аварийный коллектор. Трассы ниже границы УГВ имеют отрицательные амплитудные аномалии, о которых говорилось ранее.

На дренированность массива пород также могут указывать изменения формы годографов, снятых с помощью СМР. При проведении работ, позволивших построить куб амплитуд рис. 6, был произведен и ряд СМР-измерений. Два годографа из этих съемок представлено на рис. 7. Годограф рис. 7, а снят на расстоянии от воронки и имеет типичную форму, соответствующую средней диэлектрической проницаемости верхнего слоя пород $\epsilon' = 12,76$. Это значение характерно для этой площадки обследования и подтверждено серией других

СМР-съемок и ГОС от локальных объектов. Годограф рис. 7, б снят над воронкой (цифра 1 рис. 6). Его среднее значение $\epsilon' = 6,69$, что является заниженным, аномальным значением, вместе с воронкой указывающим на аварийное место. Обобщая можно сказать, что интерпретационными признаками зон дренированных пород являются специфические волновые аномалии и формы годографов.

Выводы

Таким образом, георадиолокация является достаточно эффективным средством обследования массивов пород вблизи аварийных коллекторов. При этом можно решать задачи выявления линз водонасыщенных пород и погребенных русел рек. А также выявления техногенных полостей и участков дренированных пород, вызванных авариями.

Коллектора достаточно часто прокладываются на тех глубинах и в настолько сложных для обследования грунтах, что традиционные георадары могут плохо справиться с описываемыми задачами. Выходом здесь может быть в использовании низкочастотных сверхмощных георадаров с резистивно-нагруженными антеннами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конюхов Д.С. Использование подземного пространства: учеб. пособие для вузов. – М.: Архитектура-С, 2004. – 296 с.
2. Изюмов С.В., Дручинин С.В., Вознесенский А.С. Теория и методы георадиолокации: Учеб. пособие. – М.: Горная книга, 2008. – 196 с.
3. Набатов В.В., Морозов П.А. Оценка карстово-суффозионной опасности с помощью георадаров с резистивно-нагруженными антеннами // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 8. – С. 83–89.
4. Набатов В.В., Гайсин Р.М., Гораньков И.И. Опыт георадиолокационного обследования массива для прогнозирования условий шитовой проходки коллекторов в условиях мегаполиса // Горный информа-

ционно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 8. – С. 202–211.

5. Wu T.T., King R.W.P. The Cylindrical Antenna with Nonreflecting Resistive Loading. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. May 1965. V. AP-13, N.3.

6. Георадары серии «Лоза» – раздел сайта производителя георадара, ООО «Компания ВНИИСМИ» [Электронный документ]. <http://www.geo-radar.ru/articles/article2.php>. Проверено 11-01-2015.

7. Набатов В.В., Морозов П.А., Семенхин А.Н. Выявление подземных коммуникаций на площадке строительства с помощью георадаров с резистивно-нагруженными антеннами // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 10. – С. 120–134.

8. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. Учебное пособие. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 153 с.

9. De Domenico D., Teramo A., Campo D. GPR surveys for the characterization of foundation plinths within a seismic vulnerability analysis // *Journal of Geophysics and Engineering*. 2013. Volume 10. Number 3.

10. Daniels, David. *Ground-penetrating radar*. – 2nd ed. – The Institution of Electrical Engineers, London, 2004. – 734 pp.

11. Копейкин В.В. Обратная задача георадиолокации [Электронный документ]. <http://www.geo-radar.ru/articles/article4.php>. Проверено 11–01-2015.

12. Голосов В., Захаров В., Костюченко С., Липовещкий И. Малоуглубинная сейсморазведка – эффективный инструмент московских градостроителей // *Инженерные изыскания*. – 2008. – № 2. – С. 76–85. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Набатов Владимир Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: ftkp@mail.ru, МГИ НИТУ «МИСиС».

UDC 550.8:625.78:656.085

GPR SURVEYS OF SUBSOIL NEAR DAMAGED UNDERGROUND UTILITIES INVOLVING CMP METHODIC

Nabatov V.V., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: ftkp@mail.ru, Moscow Mining Institute, National University of Science and Technology «MISS», 119049, Moscow, Russia.

Experience of ground penetrating radar surveys of subsoil near damaged underground utilities is generalized. Radargrams, interpretation and identification features of water-saturated rocks zones, buried river channels, voids caused by utility damage and drained rocks zones are shown. The results of CMP-researches are used as one of the identification features. Surveys are conducted by superpower low frequency GPR with resistively loaded dipoles (resistive Vee dipole, loaded with the Wu-King profile).

Key words: damaged underground utilities, water-saturated rocks zones, buried river channels, voids, drained rocks zones, ground-penetrating radar, GPR, superpower GPR, low frequency GPR, high penetration depth.

REFERENCES

1. Konyukhov D.S. *Ispol'zovanie podzemnogo prostranstva: ucheb. posobie dlya vuzov* (Use of the underground area. Higher educational aid), Moscow, Arkhitektura-S, 2004, 296 p.
2. Izyumov S.V., Druchinin S.V., Voznesenskii A.S. *Teoriya i metody georadiolokatsii: Ucheb. posobie* (Theory and method of radiolocation. Educational aid), Moscow, Gornaya kniga, 2008, 196 p.
3. Nabatov V.V., Morozov P.A. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2013, no 8, pp. 83–89.
4. Nabatov V.V., Gaisin R.M., Goran'kov I.I. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2011, no 8, pp. 202–211.
5. Wu T.T., King R.W.P. The Cylindrical Antenna with Nonreflecting Resistive Loading. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. May 1965. V. AP-13, N.3.
6. *Georadary serii «Loza» razdel saita proizvoditelya georadara, OOO «Kompaniya VNIISMI»* (Loza series georadars: Fund of Underwater Geophysical Researches company-manufacturer website), available at: <http://www.geo-radar.ru/articles/article2.php> (accessed 11.01.2015).
7. Nabatov V.V., Morozov P.A., Semenikhin A.N. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2012, no 10, pp. 120–134.
8. Vladov M.L., Starovoitov A.V. *Vvedenie v georadiolokatsiyu. Uchebnoe posobie* (The introduction to georadiolocation. Educational aid), Moscow, izd-vo MGU, 2004, 153 p.
9. De Domenico D., Teramo A., Campo D. GPR surveys for the characterization of foundation plinths within a seismic vulnerability analysis. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2013. Volume 10. Number 3. DOI:10.1088/1742-2132/10/3/034007
10. Daniels, David. *Ground-penetrating radar*. 2nd ed. The Institution of Electrical Engineers, London, 2004. 734 pp.
11. Kopeikin V.V. *Obratnaya zadacha georadiolokatsii* (Inverse problem of georadiolocation), available at: <http://www.geo-radar.ru/articles/article4.php> (accessed 11.01.2015).
12. Golosov V., Zakharov V., Kostyuchenko S., Lipovetskii I. *Inzhenernye izyskaniya*. 2008, no 2, pp. 76–85.